

결정질 태양전지의 Micro-crack 패턴에 따른 PV모듈의 전기적 특성에 관한 연구

논 문
61-3-9

A Study on the Electrical Characteristics of Photovoltaic Module Depending on Micro-Crack Patterns of Crystalline Silicon Solar Cell

송 영 훈* · 강 기 환† · 유 권 중** · 안 형 근*** · 한 득 영§

(Young-Hun Song · Gi-Hwan Kang · Gwon-Jong Yu · Hyung-Gun Ahn · Deuk-Young Han)

Abstract - This study investigated the process of thermal-induced growth of micro-crack developed at the crystalline solar cell using EL image, determined the output characteristic according to the pattern of micro-crack, analyzed the I-V characteristic according to the pattern of crack growth, and predicted the output value using simulation. The purpose of this study was, therefore, to investigate the process of thermal-induced growth of micro-crack developed at the early stage of PV module completion using EL image, to analyze the resulting decrement of output and predict the output value using simulation. It was observed that the crack grew increasingly by the thermal condition, and accordingly the lowering of output was accelerated. The output values of crack patterns with various direction were predicted using simulation, resulting in close I-V curve with only around 4% of error rate. It is considered that it is possible to predict the electric characteristic of solar cell module using only pattern of micro-crack occurred at solar cell based on our results.

Key Words : PV module, Micro-crack, EL image, I-V Curve, Simulation

1. 서 론

실리콘 결정질 태양전지는 200 μ m 내외의 얇은 기판으로 연성이 작아 약한 충격에도 쉽게 파손되며 태양전지 한 장은 약 0.6V의 매우 낮은 출력을 갖기 때문에 여러 장의 태양전지를 직렬연결 후 모듈화 하여 사용 한다.

얇은 결정질 웨이퍼가 태양전지, 모듈로 완성되기까지는 수많은 공정을 요하게 되는데 이때 지속적으로 받게 되는 기계적 스트레스에 의해 태양전지는 micro-crack이 발생될 수 있다. 또한 외부에 노출되어 발전을 수행하는 동안 눈, 비, 바람, 우박과 같은 자연환경에 의해 micro-crack이 생성될 수 있으며 더욱이 이런 영향으로 인해 crack으로 성장하게 된다.[1]

PV모듈 내부에 생성된 태양전지 micro-crack은 수 μ m 내외의 실금 형태로 육안으로는 식별이 어렵고 초기 전기적 출력 값 또한 안정적이어서 정상 모듈로 소비자에게 공급된다. 하지만 태양전지를 직렬 회로로 구성하고 있는 PV모듈 특성상 micro-crack을 내포하고 있는 태양전지는 장기적으

로 crack으로 성장하여 모듈에 출력 부정합(mismatch)을 가져와 단일 모듈은 물론 시스템 전체적으로 발전 성능에 영향을 주게 되며, micro-crack을 내포하고 있는 태양전지는 열점 현상으로 인해 노화 현상이 가속되어 모듈 수명을 단축시키는 주요 원인이 될 수 있다.[2][3]

이에 본 논문에서는 PV모듈의 태양전지에 생성된 micro-crack의 성장 원인에 대해 살펴보고, 결정질 태양전지의 micro-crack 패턴을 EL image를 통해 분석하고 이를 시뮬레이션 하여 그 출력 값을 예측하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

2.1.1 태양전지 Micro-crack의 성장

PV모듈은 태양전지 전면을 보호하기 위하여 투명한 저철분 강화 유리가 쓰이고, 후면에는 습기 침투를 방지하기 위해 Back-sheet, 그리고 태양전지를 보호하고 전·후면 소재들을 상호 결합시키기 위해 EVA sheet가 사용된다. 따라서 PV모듈은 그림 1과 같이 Glass/EVA/Solar cell/EVA/Back-sheet의 형태로 적층 후 진공상태에서 열·압축을 가하여 봉합하는 공정(Lamination process)을 요한다. [4]

태양전지는 모듈로 완성되기까지 많은 공정이 진행되는 동안 지속적인 기계적 스트레스를 받게 되며 또한 모듈로써 옥외에서 발전을 수행 중 자연환경에 노출됨으로 인해 다양한 스트레스를 겪게 되어 그림 2와 같은 micro-crack이 생성될 수 있다.

* 준 회 원 : 건국대학교 전기공학과 석사과정
 ** 종신회원 : 한국에너지기술연구원 태양에너지연구단 책임연구원
 *** 정 회 원 : 건국대학교 전기공학과 교수
 § 종신회원 : 건국대학교 전기공학과 교수
 † 교신저자, 정회원 : 한국에너지기술연구원 태양에너지연구단 책임연구원

E-mail : ghkang@kier.re.kr

접수일자 : 2011년 6월 14일

최종완료 : 2011년 12월 19일

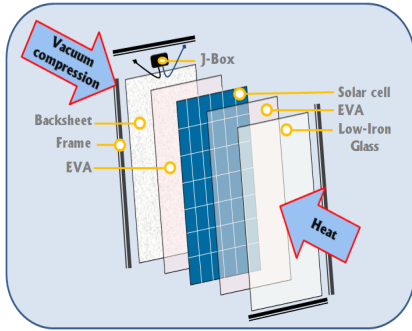


그림 1 결정질 PV모듈의 구조
Fig. 1 Structure of Crystalline PV module

이러한 PV모듈에서의 태양전지 micro-crack은 내부 층진체인 EVA와 다른 재료들과의 가교 결합으로 초기에는 큰 변형 없이 형태를 유지하게 되지만, 각기 다른 재료들의 열팽창과 수축으로 인해 crack으로 성장될 것으로 사료된다.

모든 물질은 단위 길이 1[m]에 대해 1[°C] 온도 상승 시 길이가 팽창되는 정도의 크기를 정해 놓은 고유 선팽창 계수를 갖고 있다.

따라서 PV모듈에 사용된 모든 재료들은 각기 다른 팽창 계수로 인해 micro-crack을 내포하고 있는 태양전지에 영향을 주게 될 것이다.

아래 식 (1)과 (2)는 길이 팽창과 면 팽창에 대한 각각의 식이다.

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T) \tag{1}$$

위의 식에서 L_0 는 팽창 전 길이, α 는 선팽창 계수, ΔT 는 온도 변화량을 나타낸다.

$$S = S_0(1 + 2\alpha \Delta T) \tag{2}$$

또한 위의 식에서 S_0 는 팽창 전 길이, α 는 면 팽창 계수, ΔT 는 온도 변화량을 나타낸다.

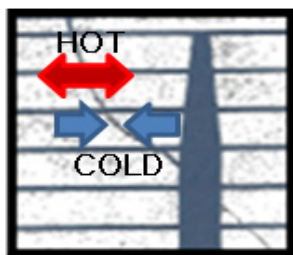


그림 2 온도 변화에 따른 micro-crack의 성장
Fig. 2 Growth of micro-crack depending on temperature

2.1.2 태양전지의 micro-crack 패턴에 따른 전기적 출력 분석

결정질 태양전지의 금속전극은 광 에너지를 흡수하여 생성된 전하(charge, 전자와 홀)를 수집하고 외부도선인 리본

전극과 이어주는 도선이다. 그림 3과 같이 태양전지의 전면 에 80~100[μm] 내외로 고르게 분포되어 있는 실선들이 finger 전극이고, finger 전극들과 수직으로 맞닿은 굵은 선들이 busbar 전극이다. PV 모듈은 전압이 낮은 태양전지를 직렬회로로 구성하여 전하를 수집하게 되는데 이것은 마치 건전지의 (+)와 (-)를 접속하는 것처럼 태양전지 전면 busbar 전극과 다음 태양전지의 후면 busbar 전극에 배선재료인 리본 도선을 붙여 연결한 것과 같다.[5]

만약 태양전지에 외부 도선인 리본 전극이 연결 되지 않는다면 태양전지의 전기적 출력은 micro-crack의 패턴에 관계없이 면적에 비례하여 동일한 출력 값으로 저하될 것이다. 하지만 외부 리본 도선이 busbar 위에 접촉됨으로 인해 crack의 패턴에 따라 태양전지의 출력 값은 크게 바뀌게 될 것이다. 즉, micro-crack이 성장하여 금속전극이 끊어지고 틈이 벌어져 분리되더라도 분리된 조각이 외부 리본전극과의 접촉 유·무에 따라 활성 영역과 비활성 영역으로 구분되어 활성 영역의 면적에 의해 전기적 출력 값은 달라진다..

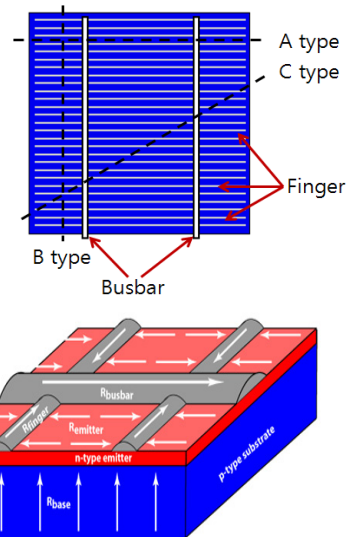


그림 3 태양전지의 금속전극과 micro-crack의 패턴
Fig. 3 Pattern of Solar cell with metal electrodes and micro-crack

따라서 본 논문에서는 crack을 3가지 패턴으로 가정하여 수학적 모델링을 유도해 보았다.

가. A type crack

A type은 crack이 finger 전극과 평행하고 busbar 전극과 수직 방향으로 발생된 것으로 태양전지가 ①번과 ②번 영역으로 분리될 것이다.

하지만 finger 전극을 따라 모인 전하들은 busbar 전극과 붙어있는 외부 도선인 리본 도선을 따라 ①번 영역과 ②번 영역에서 각각 수집된 전하들이 원활히 이동하게 될 것이다. 즉, 리본도선에 의해 태양전지는 병렬회로가 되어 전압은 일정하게 유지되고, 전류는 $I_{①} + I_{②} = I_{total} = I_{out}$ 과 같게 되어 출력에는 큰 변화가 없을 것이다.

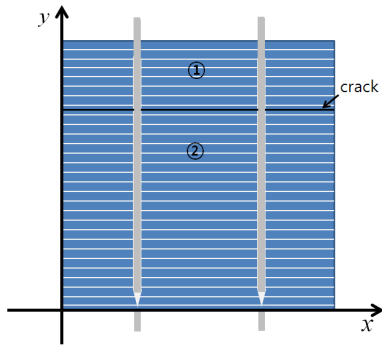


그림 4 A type micro-crack의 모델
Fig. 4 Model of A type micro-crack

그림 5는 A type crack에 대한 병렬관계를 등가회로로 도식화 한 것이다.

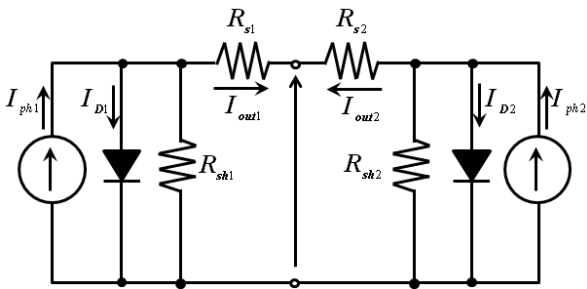


그림 5 A type micro-crack의 등가회로
Fig. 5 Equivalent of A type micro-crack

정상 상태의 태양전지의 등가회로 식은 식 (3)과 같다.

$$I_{out} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \frac{q(V + R_s I)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

하지만 병렬 등가회로를 고려한 식은 (2.4)와 같이 유도할 수 있다.

$$I_{out} = (I_{ph①} + I_{ph②}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

여기서 광 생성전류 I_{ph} 는 전류밀도 J 와 태양전지 면적 A 의 곱으로 구해진다.

$$I_{ph} = JA \quad (5)$$

A type crack에서 총 태양전지 면적 A 는 $A = A_① + A_②$ 이다.

따라서 식(4)에서의 I_{ph} 를 J 와 A 로 풀어 쓰면 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

$$I_{out} = (JA_1 + JA_2 - JA_{defect}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

$$I_{out} = J(A_1 + A_2 - A_{defect}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

$$I_{out} = J(A - A_{defect}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (8)$$

여기서 A_{defect} 는 crack이 발생하면서 생겨난 작은 결점 영역을 의미하며, 식 (8)에서 볼 수 있듯이 A type crack의 경우 태양전지의 전체 면적에서 미세 결함 면적만이 빠지므로 출력에는 큰 영향이 미치지 않을 것으로 판단된다.

나. B type crack

B type crack은 그림 6과 같이 B영역으로 busbar 전극을 기준으로 전지의 측면에서 y 축과 평행한 ①영역에서 생성된 crack과 busbar와 busbar 사이의 ②영역에서 부분 영역으로 발생된 crack을 정의 하였다. B type의 경우는 전체 태양전지 면적에서 crack으로 분리된 비활성 영역만큼 빼주는 아래와 같은 식으로 유도하였다.

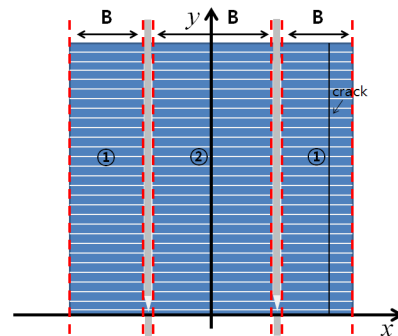


그림 6 B type micro-crack의 모델
Fig. 6 Model of B type micro-crack

B type과 같이 crack이 발생하였을 경우에는 식 (2.9)와 같이 유도 할 수 있다.

$$I_{out} = (I_{ph(total)} - I_{ph(defect)}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (9)$$

즉, 정상 태양전지의 광 생성 전류 I_{ph} 의 값에서 비활성 결함 영역의 광 생성 전류 I_{ph} 만큼 빠지게 되는 것이다.

식 (9)에서의 I_{ph} 를 J 와 A 로 풀어 쓰면 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

$$I_{out} = (JA_{total} - JA_{defect}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (10)$$

$$I_{out} = J(A_{total} - A_{defect}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (11)$$

위의 식과 같이 B type의 crack이 생성된 태양전지는 비활성 결함 영역을 제외한 정상 A_{normal} 에서의 등가회로 식이 되는 것이다.

$$I_{out} = J(A_{normal}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V + IR_s)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (12)$$

B type은 crack으로 인해 비활성 영역으로 분리되는 면적에 비례하여 광 생성 전류량이 줄어들게 될 것이다.

다. C type crack

C type crack은 그림 7과 같이 태양전지 사선 방향으로 발생한 crack을 정의 하였다.

C type은 태양전지에 사선으로 crack이 발생할 경우 finger 도선이 끊어져 전하가 busbar까지 이동하지 못해 busbar 전극을 기준으로 바깥영역의 finger 전극과 삼각형 형태의 면적만큼 출력이 저하될 것으로 여겨진다.

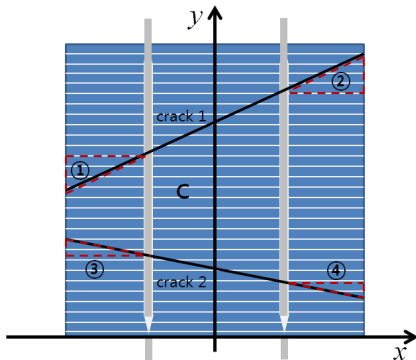


그림 7 C type micro-crack의 모델
Fig. 7 Model of C type micro-crack

이때, 삼각형의 비활성 영역 면적은 벡터(vector) 외적을 이용하여 다음과 같이 낼 수 있다.

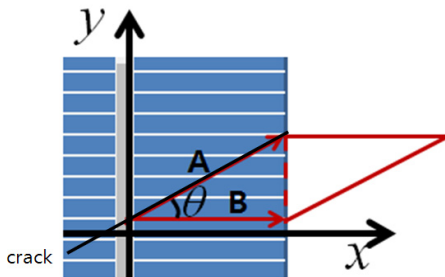


그림 8 벡터의 외적을 이용한 비활성 면적 계산
Fig. 8 Calculate of inactive area using a cross product of vector

그림 8에서와 같이 두 벡터 A, B 의 벡터 곱 $A \times B$ 의 크기 $|A \times B| = AB \sin \theta$ 는 한변의 길이 A 에 그 높이 $B \sin \theta$ 를 곱한 것과 같으므로 결국 $|A \times B|$ 는 A 와 B 로 이루어지는 평행사변형의 면적을 의미한다. 이때 평행사변형의 면적을 이등분 하면 구하고자 하는 삼각형의 면적 A 를 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.[6]

$$A = \frac{\|A\| \|B\| \sin \theta}{2} \quad (13)$$

정상 태양전지의 광 생성 전류 I_{ph} 에서 비활성 결함 영역의 광 생성 전류 I_{ph} 만큼을 빼면

$$I_{out} = (I_{ph(total)} - I_{ph(defect)}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (9)$$

와 같다. 위의 식 I_{ph} 를 J 와 A 로 풀어 쓰면 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다. 비활성 영역의 면적 A 는 식 (12)의 벡터에 의한 수식을 대입하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{out} = J \left\{ A_{total} - \left(\frac{\|A\| \|B\| \sin \theta}{2} \right) \right\} - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (14)$$

$$I_{out} = J(A_{total} - A_{defect}) - I_0 \left[\exp \frac{q(V)}{nkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (15)$$

2.2 실험 내용 및 결과 고찰

실제로 태양전지에 발생하는 micro-crack의 패턴은 다양하고 복잡적이다. 하지만 앞에서 분석한 세 가지 패턴을 적용한다면 전기적 출력 값은 예측 가능하리라 여겨진다. 그림 9는 실제로 태양전지에 발생된 micro-crack에 의한 출력 저하를 예측하고자 패턴을 분석한 이미지이다. 전하가 수집되지 않는 비활성 영역은 B type의 B 영역과 C type의 C_1, C_2, C_3 로 분석되며, 아래 식 (16)과 같이 면적을 계산하여 출력 값을 예측 할 수 있다.

$$A_{normal} = A_{total} - (A_B + A_{C_1} + A_{C_2} + A_{C_3}) \quad (16)$$

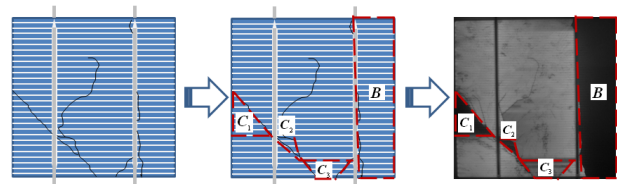


그림 9 Micro-crack 패턴에 따른 출력 분석 이미지
Fig. 9 Image of output analysis depending on Micro-crack patterns

따라서 태양전지 micro-crack이 적용된 PV모듈의 실측값과 EL image로 관찰하여 세 가지 패턴 형상으로 기인한 시뮬레이션 결과는 그림 10과 같이 비교하였다.

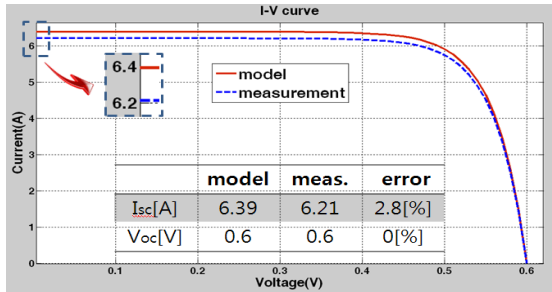


그림 10 시뮬레이션과 실측값의 I-V curve 비교
 Fig. 10 Comparison of I-V curve with theoretical prediction and experimental

위와 같이 비교한 결과 실제 측정된 출력 값 대비 시뮬레이션 오차율은 3% 내외의 결과를 얻을 수 있었다.

또한 아래 그림 11과 같이 다양한 실험 시료들을 제작하여 위와 같은 방법으로 검증하여 오차율을 계산하였다.

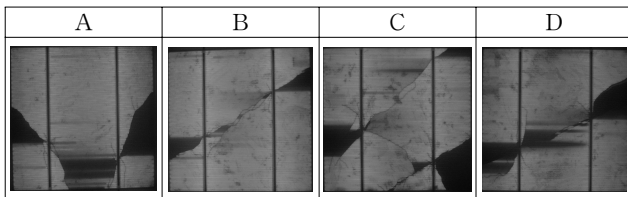


그림 11 Micro-crack 패턴에 따른 출력 분석 시료
 Fig. 11 Samples of output analysis depending on Micro-crack patterns

표 1 micro-crack 시료들의 출력 비교
 Table 1 Fault simulation results

		A	B	C	D	비교
I_{out} [A]	model	7.60	8.04	7.64	7.57	
	measurement	7.38	7.94	7.39	7.27	
error[%]		3.65	1.24	2.37	3.96	

표 1에서 확인할 수 있듯이 패턴을 분류하여 모델링한 값과 실측한 값의 차이는 크게 4% 내외로 매우 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 실측값과 시뮬레이션 결과 값이 오차를 갖는 이유는 육안으로 확인되지 않은 비활성 영역 면적의 누락과 성장 중에 있는 micro-crack의 저항 성분에 의한 것으로 사료된다.

3. 결론

본 논문에서는 micro-crack을 내포하고 있는 태양전지가 PV모듈로서 옥외에 노출되었을 때 crack이 성장하는 원인에 대해 알아보고, crack 패턴 형상에 따른 전기적 출력 특성을 분석하여 모델링 값과 그 출력 값을 비교하였다.

PV모듈에서 태양전지의 micro-crack 성장 원인은 태양전지 모듈에 사용되는 구성 재료들의 각기 다른 열팽창에 의한 것이라 판단되며, crack으로 파손된 태양전지는 금속 전극이 끊어지고 조각으로 분리되어 전하 수집에 영향을 주어 출력 저하를 가져온다.

또한, 결정질 태양전지의 전면 금속 전극은 태양전지에서 생성된 전하를 효율적으로 수집 하기위한 최적의 패턴으로 설계되어 crack과의 상호 패턴에 따라서 전하의 수집량이 달라진다. 따라서 본 논문에서는 crack의 방향에 기인하여 세 가지 패턴 형상으로 분류하고 이를 시뮬레이션 하여 I-V Curve를 얻었다. 이때 실제 측정된 출력 값 대비 시뮬레이션 오차율은 3% 내외의 매우 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 실측값과 시뮬레이션 결과에서의 오차는 육안으로 확인되지 않은 비활성 영역 면적의 누락에 의한 것이라 사료된다.

본 연구를 통해 얻은 결과로 볼 때 태양전지의 micro-crack은 온도 변화에 따른 열적 스트레스에 의해 지속적으로 성장된 것을 확인하였으며, 이러한 영향을 줄이기 위해서는 PV모듈에 사용되는 구성 재료들의 열적 안정성이 고려되어야 할 것이며, 열팽창을 고려한 PV모듈 구조의 최적 설계가 필요하다고 판단된다. 또한 본 논문에서 제안한 세 가지 패턴을 적용하여 초기 micro-crack의 EL image를 분석한다면 전기적 출력 변화가 예측 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP) 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.
 (No.20113010010010-11-1, No.20113010010020-11-1)

참고 문헌

- [1] 송영훈, 강기환, 유권중, 안형근, 한득영 “PV모듈에서 온도 영향에 의한 micro-crack 성장과 전기적 특성 분석” 대한 전기 학회 하계학술대회 논문집 2011
- [2] M. Kontges, I. Kunze, S. Kajari-Schroder, X. Breitenmoster, B. Bjorneklett "The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks", Solar Materials & Solar cells, 2010
- [3] C. Hilmersson, D.P. Hess, W. Dalls, S. Ostapenko, "Crack detection in single-crystalline silicon wafers using impact testing", ScienceDirect, 2007
- [4] 강기환 외, “태양전지모듈 제조를 위한 요소기술 기초 연구”, 대한 전기 학회 하계학술대회 논문집, 2003
- [5] 이재형, 임동건, 이준신, “태양전지 원론”, 홍릉과학 출판사, 2005
- [6] 한득영, “전자기학”, 도서출판 인터비전, 2000

저 자 소 개



송 영 훈 (宋 咏 勳)

건국대학교 전기공학과 전기전자재료 및
센서 석사과정(4차)
E-mail : derick@kier.re.kr



강 기 환 (姜 琦 煥)

1993년 건국대학교 전기공학과 공학석사
2009년 건국대학교 전기공학과 공학박사
현 한국에너지기술연구원 태양에너지
연구단 책임연구원
E-mail : ghkang@kier.re.kr



유 권 중 (劉 權 鍾)

1985년 일본 KOBE대학교 전기공학석사
1989년 일본 KOBE대학교 전기공학박사
현 한국에너지기술연구원 태양에너지
연구단 책임연구원
E-mail : y-gj@kier.re.kr



안 형 근 (安 亨 根)

1985년 연세대학교 전기공학과 공학석사
1993년 Dept. of EE, University of
Pittsburgh 공학박사
현 건국대학교 전기공학과 교수
E-mail : hkahn@konkuk.ac.kr



한 득 영 (韓 得 永)

1974년 연세대학교 전기공학과 공학석사
1984년 연세대학교 전기공학과 공학박사
현 건국대학교 전기공학과 교수
E-mail : dyhan@konkuk.ac.kr